Die Wirkung thermischer Neutronen auf Aluminium

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
genehmigt von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

Von
Paul Wang
aus Tsingtao (Prov. Schantung, China)

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Mai 1938
Tag der Promotion: 15. Juni 1938

Jena 1938

Universitäts-Buchdruckerei Gustav Neuenhahn, Jena

N 42

Referenten:

Dozent Dr. K. Philipp.

Prof. Dr. W. Kolhörster.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhaltsverzeichnis.

Seite

A. Einleitung 5

B. Versuchsanordnung 9

C. Versuchsergebnisse 11

1. Bestimmung der bei dem Einfangprozeß wirksamen Energiegruppe . 11

2. Absorptionsmessungen in Aluminium mit Aluminium-Indikator . . . 14

3. Absorptionsmessung in Aluminium mit Rhodium-Indikator 15

4. Ueber die Bestrahlung „innerhalb Paraffin“ 16

a) Verstärkung der Aktivierung 16

b) Absorptionsmessung 17

D. Zusammenfassung 18

A. Einleitung.

F e r m i und Mitarbeiter [1]) haben bekanntlich gezeigt, daß die Bestrahlung von Aluminium mit Neutronen zur Bildung von instabilen Atomarten führt, die unter Aussendung von negativen Elektronen (β-Strahlen) nach radioaktiven Gesetzen zerfallen, und daß es sich hierbei um drei verschiedene Prozesse handelt, die durch das folgende Schema dargestellt werden können:

$$\text{I.}\quad {}^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} = {}^{24}_{11}\mathrm{Na} + {}^{4}_{2}\alpha,\ {}^{24}_{11}\mathrm{Na} \xrightarrow{15^{h}} {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + \mathrm{e}^{-}$$

$$\text{II.}\quad {}^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} = {}^{27}_{12}\mathrm{Mg} + {}^{1}_{1}\mathrm{H},\ {}^{27}_{12}\mathrm{Mg} \xrightarrow{10\ \text{Min.}} {}^{27}_{13}\mathrm{Al} + \mathrm{e}^{-}$$

$$\text{III.}\quad {}^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} = {}^{28}_{13}\mathrm{Al},\qquad {}^{28}_{13}\mathrm{Al} \xrightarrow{2{,}3\ \text{Min.}} {}^{28}_{14}\mathrm{Si} + \mathrm{e}^{-}$$

Die gebildeten instabilen Atomarten zerfallen mit einer für jede Atomart charakteristischen Halbwertszeit von 15 Stunden bzw. 10 Minuten bzw. 2,3 Minuten zu bekannten stabilen Atomarten. Die Versuche von L. M e i t n e r [2]) mit den durch γ-Strahlen aus Beryllium ausgelösten Neutronen, die erheblich langsamer sind als die durch α-Strahlen in Beryllium erzeugten Neutronen, zeigten, daß der dritte Prozeß als direkter Anlagerungsprozeß auch durch diese Neutronen angeregt wird, während für die Prozesse I und II im allgemeinen schnellere Neutronen erforderlich sind. Eine viel weitergehende Bestätigung hierfür erbrachten die Versuche von F e r m i und Mitarbeitern. Sie konnten zeigen, daß die Prozesse III sehr erheblich verstärkt werden, wenn die Neutronen vor ihrem Auftreffen auf die zu aktivierende Substanz stark verlangsamt worden sind. Solche Verlangsamung wird erreicht, wenn man schnelle Neutronen durch wasserstoffhaltige Substanzen wie Wasser oder Paraffin schickt. Hier können die Neutronen mit den gleich schweren Wasserstoffkernen zusammenstoßen und so schon nach wenigen Zusammenstößen fast ihre gesamte Energie verlieren und bis auf thermische Energien verlangsamt werden.

Mit der Dicke der durchlaufenen Paraffinschicht müßte die relative Anzahl thermischer Neutronen dauernd zunehmen, wenn nicht

---

1) E. Fermi, E. Amaldi, O. D'Agostino, B. Pontecorvo, F. Rasetti und E. Segrè, Proc.Roy.Soc., London (A), **146**, 483, 1935; **149**, 522, 1935.

2) L. Meitner, Naturw. **22**, 759, 1934.

ein Teil der thermischen Neutronen von den Wasserstoffkernen eingefangen würde, wobei schwere Wasserstoffkerne (Deuteronen) entstehen [$^1_1H + ^1_0n = ^2_1D$]. Dieser Einfangprozeß ist allerdings relativ selten. Aus den neuesten Messungen über die Wahrscheinlichkeit dieses Einfangprozesses [3]) folgt, daß ein Neutron thermischer Geschwindigkeit in Paraffin im Mittel zirka 200 Zusammenstöße mit Protonen macht, bevor es eingefangen wird. Das entspricht einem Diffusionsweg von rund 3 cm, d. h. ein Neutron thermischer Energie legt in Paraffin eine Strecke von 3 cm zurück, bevor es eingefangen wird.

Die Neutronen, die bei Bestrahlung von Be mit den α-Strahlen von Radium + Zerfallsprodukten erzeugt werden, haben etwa die Energie von 10^5 bis 10^7 Volt. Wenn man diese Neutronen durch Paraffin hindurchgehen läßt, so werden Neutronen von der maximal vorhandenen Energie bis zu thermischen Energien herab aus dem Paraffin austreten. Aus den vorstehend geschilderten Anschauungen über den Prozeß der Verlangsamung der Neutronen und ihrem schließlichen Absterben durch die Bildung von Deuteronen folgt, daß die Zahl der verlangsamten Neutronen zunächst mit der Dicke der Paraffinschicht zunimmt, ein Maximum erreicht und dann für noch weiter anwachsende Paraffindicken abnehmen wird. Es ist leicht einzusehen, daß dieses Maximum für thermische Neutronen erst bei größeren Paraffinschichten erreicht wird als etwa für Neutronen von einigen Volt bis etwa 100 Volt Energie. Amaldi und Fermi [4]) haben die räumliche Verteilung der verlangsamten Neutronen in Wasser anstatt in Paraffin sauber gemessen. Das Maximum der Ausbeute an Neutronen thermischer Geschwindigkeit liegt danach ziemlich genau bei einem Abstand von 10 cm von der von ihnen gebrauchten Neutronenquelle (Be + RaEm), während das Maximum für Neutronen von einigen Volt etwa bei einem Abstand von 5 cm von der Quelle erreicht wird. Die relative Anzahl schneller Neutronen, langsamer Neutronen und thermischer Neutronen hängt also stark von der Dicke der durchlaufenen wasserstoffhaltigen Substanz ab.

Durch eine Reihe von Arbeiten verschiedener Forscher [5]) ist nun gezeigt worden, daß bei vielen Elementen die Erscheinung der selektiven Absorption langsamer Neutronen auftritt, d. h. es werden bestimmte von Element zu Element verschiedene Neutronen-

3) O. R. Frisch, H. v. Halban und J. Koch, Nature **140**, 895, 1937.
4) E. Fermi und E. Amaldi, Phys.Rev. **50**, 899, 1936.
5) T. Bjerge und C. H. Westcott, Proc.Roy.Soc. London (A), **150**, 709, 1935. P. B. Moon und I. R. Tillman, Nature **136**, 66, 1936. H. H. Goldsmith und F. Rasetti, Phys.Rev. **50**, 328, 1936.

geschwindigkeitsbereiche besonders stark absorbiert. Z. B. absorbiert Cadmium sehr stark die thermischen Neutronen und ist für Neutronenenergien größer als 0,5 Volt praktisch durchsichtig. Wolfram[6]) hat eine Resonanzabsorption bei etwa 9 Volt. Die selektive Absorption wird besonders deutlich, wenn man dasselbe Element als Absorber und Indikator verwendet, und wenn man außerdem durch eine dünne Schicht Cadmium die thermischen Neutronen von vornherein ausfiltert. Diese Tatsache, die von Amaldi und Fermi und unabhängig von Szilard beobachtet worden ist, läßt die Anwesenheit von verhältnismäßig schmalen Absorptionsbanden vermuten, die für die verschiedenen Elemente charakteristisch sein dürften. Die zur Zeit bekannten Resonanzenergien sind von Fleischmann und Bothe[7]) zusammengestellt und in der folgenden Tabelle 1 wiedergegeben worden. Die Buchstaben A, C, D und J deuten die ursprünglich von Amaldi und Fermi eingeführte Gruppeneinteilung an.

Tabelle 1.

Resonanzenergien.

Ordnungszahl	Element und Halbwertszeit	Energie in e. V.	
		Goldsmith-Rasetti	Andere
25	Mn ($2^1/_2$ h)	37	
29	Cu (5 Min.)	62	
33	As (26 h)	84	35 ± 8[8])
35	Br (18 Min.)	62	
45	Rh (44 Sek.) (D)	1,3	
	(3,9 Min.)	$\sim$ 1	
47	Ag (22 Sek.) (A)	2,5	
	(2,3 Min.)	69	
48	Cd (C)	0,026	0,37[9])
49	In (13 Sek.)	2,2	
	(54 Min.)	1,38	
53	I (25 Min.) (I)	80	32 ± 8
64	Gd		$< 0{,}026$
74	W (24,5 h)		$\approx 9 \pm 4$
75	Re (20 h)	30	
77	Ir (19 h)	1,6	
79	Au (2,7 d)	2,5	$3{,}5 \pm 0{,}5$

6) R. Jaeckel, ZS.f.Phys. **104**, 762, 1937.

7) H. Fleischmann und W. Bothe, Ergebn. d. exakt. Naturwissenschaften, Bd. XVI, S. 27, 1937. H. H. Goldsmith und F. Rasetti, Phys.Rev. **50**, 328, 1936.

8) O. R. Frisch, vgl. Danske Vid. Selsk. Math. fys. Medd. XIV, Heft 12, 1937. Vielleicht Beteiligung von 2 Resonanzniveaus.

9) M. S. Livingston und L. G. Hoffman: Phys.Rev. **51**, 1021, 1937. L. G. Hoffman und H. A. Bethe: l.c.

Als C-Neutronen wollen wir im folgenden solche Neutronen bezeichnen, die von Cadmium stark absorbiert werden. Sie bestehen hauptsächlich aus thermischen Neutronen, aber nicht aus thermischen Neutronen allein. Um die Neutronen der C-Gruppe von den anderen auszufiltern, genügt vollkommen die Zwischenschaltung eines Cadmiumfilters von etwa 0,4 g/cm². Wenn man von der Aktivität der C-Gruppe spricht, versteht man immer die Differenz zwischen der Aktivität eines Indikators, gemessen ohne Zwischenschaltung von Cadmium, und der Aktivität desselben Indikators, gemessen unter Abschirmung der C-Neutronen durch ein Cadmiumfilter. Allgemein kann man durch Verwendung geeigneter Filter für die durch Neutronen zu aktivierende Substanz und durch Bestimmung der Aktivität mit und ohne vorgeschaltetes Filter entscheiden, ob die zu aktivierende Substanz auf die Resonanzgruppe der Filtersubstanz anspricht oder nicht.

Die Erklärung der Resonanz von langsamen Neutronen ist unabhängig von Breit und Wigner[10]) und von Bohr[11]) gegeben worden. Nach Breit und Wigner besteht zwischen dem Einfangquerschnitt σ und der Energie E_n der einfallenden Neutronen folgender Zusammenhang:

$$\sigma = E_n^{-1/2} \frac{C}{(E_n - E_0)^2 + (\frac{\Gamma}{2})^2}$$

Hierbei bedeuten E_0 die Energie der Neutronen an der Stelle maximaler Absorption und Γ die Halbwertsbreite der Absorptionslinie.

Der Verlauf der Wirkungsquerschnittskurve ist also gegeben durch die Größe der Werte E_0 und Γ. In Figur 1 ist der Verlauf des Wirkungsquerschnitts für einige charakteristische Fälle dargestellt. Kurve a zeigt die beim Vorliegen einer Resonanz für langsame Neutronen weitaus häufigste Form. Der Wirkungsquerschnitt ist im allgemeinen klein. Nur für $E_n \cong E_0$ zeigt er ein steiles Maximum und für sehr kleines E_n steigt er proportional $1/v$. Für die Kurve b ist das Cadmium ein charakteristischer Vertreter. Hier ändert sich σ mit wachsendem E_n zunächst nur wenig, um von einem gewissen E_n an ziemlich schnell auf sehr kleine Werte abzunehmen. Die Kurve c gilt für diejenigen Fälle, in denen bei dem untersuchten Kern die nächste Resonanzstelle weit außerhalb des Gebietes der langsamen Neutronen liegt, oder wo die Linienbreite des Resonanzniveaus groß ist gegen die Ausdehnung des Gebietes der langsamen Neutronen.

---

10) G. Breit und E. Wigner, Phys.Rev. **49**, 519, 1936.
11) N. Bohr, Nature **137**, 344, 1936.

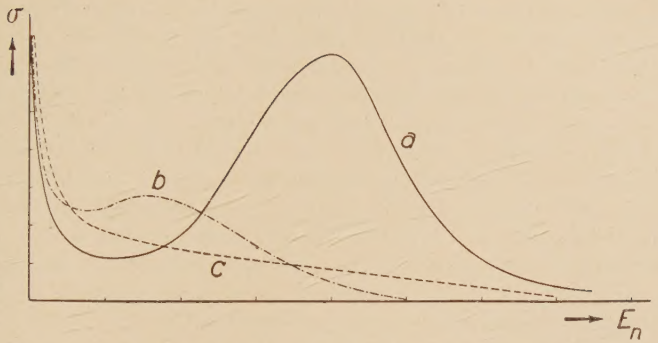

Fig. 1. Schematische Darstellung der Abhängigkeit des Einfangquerschnitts σ von der Neutronenenergie E_n.
a: Resonanzenergie $E_0 \gg$ Linienbreite Γ
b: $E_0 \cong \Gamma$
c: keine Resananz, $E_0 \gg E_n$ oder $\Gamma \gg E_n$, dann σ proportional $1/v$.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Beantwortung der Frage: Wie hängt der Anlagerungsprozeß beim ^{28}Al von der Energie der anzulagernden Neutronen ab? Die Prüfung dieser Frage führt dann notwendig auf die Untersuchung der Absorption langsamer Neutronen in Aluminium.

B. Versuchsanordnung.

Zunächst wurden einige Vorversuche ausgeführt, um die Wirksamkeit zweier verschiedener Neutronenquellen, die optimale Dicke der zur Verlangsamung der Neutronen notwendigen Paraffinschicht und die günstigste Dicke des Indikators zu bestimmen. Zur Verlangsamung der Neutronen diente ein Paraffinzylinder von 15,5 cm Höhe und 12,5 cm Durchmesser. Das Aluminiumblech, das als Indikator verwendet wurde, wurde auf die Mitte der oberen Basis des Paraffinzylinders gelegt. Der Paraffinblock enthielt seitlich eine Öffnung, in die die Neutronenquelle eingeführt werden konnte. Die zunächst zur Verfügung stehenden Quellen bestanden aus einem Glasröhrchen, das 100 mg Radium mit 500 g feinem Berylliumpulver gemischt [12]) enthielt und einem ähnlichen Röhrchen, das anstelle des Radiums Radiothor enthielt, dessen γ-Strahlung 50 mg Radium äquivalent war. Da die (Ra+Be)-Quelle sich als die wirk-

12) O. Erbacher und K. Philipp, ZS.f.Physik.Chem. (A) **176**, 169, 1936.

samere erwies, wurde im allgemeinen mit dieser Quelle gearbeitet. Ferner erhielt man die größte Aktivität des Indikators, wenn die Quelle sich 2,5 cm unterhalb der oberen Basis des Paraffinzylinders befand. Für die Wahl der günstigsten Indikatordicke sind folgende Gesichtspunkte maßgebend. Mit wachsender Schichtdicke wächst auch die Wahrscheinlichkeit, daß die auf den Indikator auftreffenden Neutronen im Aluminium eingefangen werden. Die Aktivität des Indikators wird aber durch die β-Strahlen gemessen, die beim Zerfall der entstandenen instabilen Atome ausgesandt werden. Bei zu dicker Schicht des Indikators bleiben die β-Strahlen im Indikator stecken und gelangen also nicht mehr zur Messung. Es ergibt sich daraus die Aufgabe, die optimale Schichtdicke des Indikators experimentell zu bestimmen. Für Resonanzversuche besteht außerdem die Notwendigkeit, den Indikator möglichst dünn im Verhältnis zu den benutzten Absorberschichten zu wählen. Es erwies sich daher als vorteilhaft, als Indikator eine Aluminiumfolie von 0,3 mm Dicke zu wählen.

Die endgültigen Versuche wurden daher in folgender Anordnung ausgeführt.

In dem bereits beschriebenen Paraffinzylinder befindet sich in dem Abstand von 2,5 cm von der oberen Basis des Paraffinzylinders die Neutronenquelle. Im allgemeinen diente als Quelle das (Ra+Be)-Präparat von 100 mg, das durch Zufügung zweier gleichartiger Präparate mit 255 mg bzw. 135 mg Radiumgehalt verstärkt werden konnte. Als Indikator diente eine $4 \times 3{,}5$ cm² große Aluminiumfolie von 0,3 mm Dicke, die direkt auf die Mitte der oberen Fläche des Paraffinzylinders aufgelegt wurde. Diese Art Bestrahlung wollen wir „außerhalb Paraffin bestrahlt“ nennen im Gegensatz zu der Bestrahlung „innerhalb Paraffin“, bei der auf die Indikatorfolie noch ein Paraffinblock von 10 cm Höhe aufgesetzt wurde. Zur Abschirmung der C-Neutronen dienten Cadmiumbleche von 0,4 mm Stärke.

Nach der Bestrahlung wurde die β-Strahlenaktivität des Indikators mit einem Geiger-Müllerschen Zählrohr gemessen. Das Zählrohr bestand aus einem Aluminiumrohr von 2 cm Durchmesser und 4 cm Länge, das auf eine Wandstärke von 0,1 mm abgedreht war. Es war mit Luft von 5 cm Hg-Druck gefüllt, der noch 0,8 cm Alkoholdampf zugesetzt war [13]). Der Zählerdraht war ein Eisendraht von 0,2 mm Dicke. Das so hergestellte Zählrohr hatte einen genügend großen Zählbereich, der für die ganze Zeit der Durchführung der Versuche konstant blieb. Die Zählrohrstöße wurden mit

13) Vgl. A. Trost, ZS.f.Phys. **105**, 399, 1937.

einem Verstärker, der in Fig. 2 wiedergegebenen Schaltung auf ein von Flammersfeld[14]) beschriebenes mechanisches Zählwerk übertragen. Dabei war der Widerstand R_1 ein elektrolytischer (Alkohol-Xylol) Widerstand, dessen Größe so bemessen war, daß einerseits das Zählrohr einen genügend großen konstanten Bereich hatte und andererseits das Auflösungsvermögen der Verstärkeranordnung nicht allzusehr herabgesetzt wurde. Zur weiteren Erhöhung des Auflösungsvermögens (Verkleinerung der Zeitkonstante) wurden die am Widerstand R_1 auftretenden Spannungsstöße nicht direkt, sondern unter Zwischenschaltung des Kondensators C_1 und des Gitterableitwiderstandes R_2 an das Gitter der ersten Röhre (Telefunken RE 034) geführt. An der Batterie B_1 wurde eine solche Spannung abgegriffen, daß die Endröhre (Telefunken RE 134) im allgemeinen stromlos war und nur für die Dauer jedes Registrierstoßes freigegeben wurde. Diese Röhre hatte also eine Gittervorspannung, die etwas negativer war als die zum unteren Knickpunkt ihrer Kennlinie gehörige. Es wurde nun durch Messung einer ThC-Abfallskurve gezeigt, daß die beschriebene Anordnung bei 300 statistisch verteilten Stößen pro Minute noch praktisch alle Stöße registriert. Ihr Auflösungsvermögen war für die im folgenden beschriebenen Versuche völlig ausreichend.

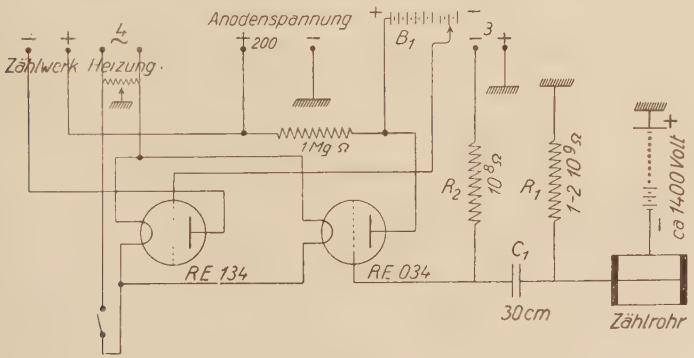

Fig. 2. Schaltskizze der Verstärkeranordnung.

C. Versuchsergebnisse.

1. Bestimmung der bei dem Einfangprozeß wirksamen Energiegruppe.

Zu diesen Versuchen standen (Radium + Beryllium)-Präparate mit einem Radiumgehalt von 350 mg zur Verfügung. Die Prä-

14) A. Flammersfeld, Naturwiss. **24**, 252, 1936.

parate befanden sich in dem beschriebenen Paraffinblock in 2,5 cm Abstand von der oberen Fläche, auf die als Indikator die 0,3 mm dicke Aluminiumfolie gelegt wurde. Zunächst wurde der Aluminiumindikator 10 Minuten lang in der Anordnung „außerhalb Paraffin" (vgl. S. 10) bestrahlt und nach der Bestrahlung sofort die β-Aktivität mit dem Zählrohr gemessen. Die Bestrahlung „innerhalb Paraffin" kam hier nicht in Frage, da man sonst durch den später beschriebenen Reflektionseffekt den Einfluß der thermischen Neutronen sehr begünstigt hätte. In der Kurve a der Fig. 3 ist der zeitliche Abfall der β-Aktivität des Indikators dargestellt. Man sieht deutlich das Auftreten zweier verschiedener Perioden. Die Hauptintensität rührt offenbar von dem 2,3-Minuten-Körper, der schwächere Anteil von dem 10-Minuten-Körper her. Dann wurde derselbe Versuch wiederholt, aber der Indikator auf beiden Seiten durch 0,8 mm Cadmium abgeschirmt. Nun konnten also die C-Neutronen (vgl. S. 8) nicht mehr zum Indikator gelangen, seine Aktivität konnte daher nur durch schnellere Neutronen (0,5—1000 Volt) hervorgerufen worden sein. Die Kurve b der Fig. 3, die die Mittel-

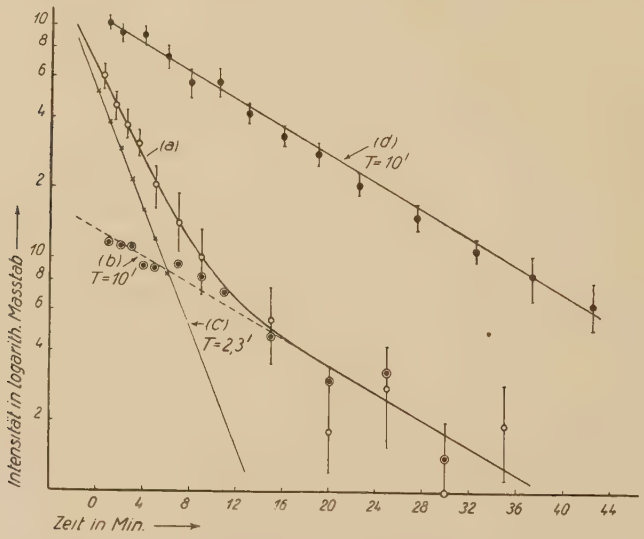

Fig 3. Aktivierung von Aluminium.

a: Durch in Paraffin verlangsamte Neutronen ○
b: Desgl., aber durch Cadmium gefiltert ⊙
c: Differenz der Kurven a und b X
d: Durch schnelle Neutronen ●

Die senkrechten Striche geben die statistischen Fehler an.

werte aus mehreren Versuchen darstellt, und daher wesentlich genauer ist als die Kurve a, zeigt keinerlei Andeutung eines 2,3-Minuten-Körpers, sondern läßt nur das Vorhandensein des 10-Minuten-Körpers erkennen. Sie fällt innerhalb der Fehlergrenzen mit dem Ende der Kurve a zusammen. Die Differenz der beiden Kurven a und b ergibt die Kurve c, die völlig mit der Halbwertszeit von 2,3 Minuten abfällt. Hieraus muß man schließen, daß der 2,3-Minuten-Körper ausschließlich durch die Wirksamkeit der C-Neutronen gebildet wird. Zur Kontrolle wurde nun der Indikator 4 Minuten lang direkt auf das Neutronenpräparat gelegt und sämtliches Paraffin entfernt, so daß im wesentlichen nur die schnellen Neutronen (10^4—10^7 Volt) einwirken konnten. Das Resultat gibt die Kurve d der Fig. 3. Es zeigt sich keine Spur eines 2,3-Minuten-Körpers, sondern es ist nur der 10-Minuten-Körper vorhanden, und zwar in etwa der 10fachen Intensität wie in den Kurven a und b. Wir müssen demnach annehmen, daß bei der Beschießung von Aluminium mit Neutronen nur die Neutronen der C-Gruppe, also im wesentlichen thermische Neutronen imstande sind, durch einen Anlagerungseffekt den instabilen ^{28}Al-Kern (2,3-Minuten-Körper) zu bilden [15]).

Nach dem in der Einleitung gesagten, läßt sich dieser Befund auf zweierlei Arten deuten:

1. *Aluminium hat ein Resonanzniveau,* dessen Energiebereich von dem des Cadmium überdeckt wird, oder

2. *Aluminium hat kein Resonanzniveau* im Energiebereich langsamer Neutronen. Dann muß sich in diesem Geschwindigkeitsbereich sein Absorptionskoeffizient für langsame Neutronen proportional $1/v$ ändern, d. h. die langsamsten (thermischen) Neutronen werden bevorzugt absorbiert. Da diese außerdem in dem vom Paraffin ausgehenden Neutronenstrom zahlenmäßig (bezogen auf gleiches Energieintervall) alle anderen langsamen Neutronen übertreffen, wird also die Aktivierung des Aluminiums hauptsächlich durch thermische Neutronen bewirkt werden.

---

15) H. Reddemann (Naturw. **26**, 124, 1938) hat kürzlich gezeigt, daß bei Verwendung sehr intensiver Quellen auch mit Neutronen von etwa 2.10^6 Volt, die er aus der Beschießung von Deuteronen mit Deuteronen erhält, der Anlagerungsprozeß beobachtbar ist. Da Reddemann jedoch keinen Wirkungsquerschnitt angibt, ist ein direkter Vergleich mit den in der vorliegenden Untersuchung beschriebenen Messungen nicht möglich. Nach mündlicher Mitteilung sind die Aktivitäten, wenn man sie auf die Stärke der hier verwandten Neutronenquellen umrechnet, bestimmt so gering, daß sie innerhalb unserer Meßgenauigkeit liegen und so einer Beobachtung unzugänglich sind.

Die Entscheidung zwischen diesen beiden Deutungsmöglichkeiten kann durch Absorptionsmessungen getroffen werden, da im Fall 1 Aluminium einen großen Absorptionskoeffizienten für C-Neutronen haben müßte.

2. Absorptionsmessungen in Aluminium mit Aluminium-Indikator.

Bei diesen Versuchen wurden Neutronenquellen mit insgesamt 450 mg Radium verwendet. Der Aluminiumindikator wurde während der Bestrahlung auf seiner Oberseite durch ein 0,4 mm dickes Cadmiumblech geschützt, um von den Wänden oder Tischen der Umgebung gestreute Neutronen fernzuhalten. Da hier nur die Neutronen beobachtet werden sollten, die zur Bildung des 2,3-Minuten-Körpers führen, wurde der Indikator nur 4 Minuten lang bestrahlt, um den Anteil des 10-Minuten-Körpers möglichst herabzudrücken. Aus den aufgenommenen Abfallskurven wurde dann stets die Aktivität bestimmt, die zur Zeit $t = 0$, d. h. sofort nach Beendigung der Bestrahlung vorhanden gewesen war. Natürlich wurde bei allen Messungen der geringe Anteil des 10-Minuten-Körpers berücksichtigt. Um bei aufeinanderfolgenden Versuchen eine allmähliche Ansammlung des 10-Minuten-Körpers zu vermeiden, wurde mit einer neuen Bestrahlung erst dann begonnen, wenn die Aktivität des Indikators völlig auf Null abgeklungen war. Schon die ersten Versuche zeigten, daß Aluminium nur eine verhältnismäßig schwache Absorption zeigt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Neutronen den Absorber nicht als paralleles Bündel treffen, sondern über alle Richtungen verteilt sind. Für diesen Fall des nicht parallelen Einfalls geben A m a l d i und F e r m i [16]) unter der Annahme einer bestimmten Winkelverteilung der Neutronen eine Absorptionskurve für dünne Indikatoren als Funktion des Produktes aus Absorberdicke und Absorptionskoeffizient. Bei der Berechnung des Absorptionskoeffizienten aus der bei einer bestimmten Absorberdicke gemessenen Schwächung wurde in der vorliegenden Untersuchung stets diese Kurve von A m a l d i und F e r m i benutzt.

Eine weitere Schwierigkeit bestand darin, daß man zur Aufnahme einer ganzen Absorptionskurve z. B. bei 3 mm, 6 mm, 10 mm und mehr Absorberdicke messen müßte. Durch derartig dicke Absorber hätte man aber die Geometrie erheblich verändert und daher nicht mehr die Kurve von A m a l d i und F e r m i zur Auswertung verwenden können. Um wiederum einigermaßen definierte Winkel-

16) E. Amali und E. Fermi, Phys.Rev. **50**, 899, 1936; vgl. auch O. R. Frisch, Mitt. d. Math.-Physik. Abt. d. Kgl. Dänischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, Bd. XIV, Nr. 12.

verhältnisse zu haben, müßte man schon Indikator und Absorber in einen solchen Abstand vom Paraffinblock haben, daß man praktisch mit parallelem Einfall der Neutronen rechnen könnte. Für einen solchen Abstand wäre aber bei den zur Verfügung stehenden Neutronenquellen die zu erwartende Aktivität zu gering. Es war daher praktischer, nur einen verhältnismäßig noch dünnen Absorber von 3 mm Dicke zu wählen, und dafür durch wiederholte Messungen für diesen Absorber die Schwächung möglichst genau zu bestimmen. Es zeigte sich, daß dieser Absorber noch 89,5 Prozent der Intensität durchläßt, die sich ohne Zwischenschaltung eines Absorbers ergibt. Hieraus ergibt sich unter Benutzung der Kurven von A m a l d i und F e r m i für den Massenabsorptionskoeffizienten von verlangsamten Neutronen in Aluminium ein Wert von K = 0,037 cm²/g. Zur Berechnung des Wirkungsquerschnitts σ setzen wir den für K erhaltenen Wert in die Beziehung

$$\sigma = \frac{K \cdot A}{L}$$

ein, wo K den Massenabsorptionskoeffizienten, A das Atomgewicht des Absorbers und L die Loschmidtsche Zahl bedeuten. Man erhält dann

$$\sigma = \frac{0{,}037 \cdot 27}{6{,}06 \cdot 10^{23}} = 1{,}6 \cdot 10^{-24}\ \text{cm}^2$$

Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem von D u n n i n g und Mitarbeitern [17]) bei Aluminium mit einem Borindikator gefundenen Wert von $1{,}5 \cdot 10^{-24}$ cm² überein. Dieser niedrige Wert für den Wirkungsquerschnitt macht es also wahrscheinlich, daß die Absorption von thermischen Neutronen in Aluminium nicht durch die Wirkung eines Resonanzniveaus bedingt ist. Es liegt also der zweite der in Abschnitt C 1 besprochenen Fälle vor, d. h. die Neutronenabsorption in Aluminium nimmt mit zunehmender Neutronenenergie stark ab. Um dies zu bestätigen, wurde folgender Versuch durchgeführt.

3. Absorptionsmessungen in Aluminium mit Rhodium-Indikator.

Mit einem Indikator aus Rhodium, das bekanntlich ein Resonanzniveau für Neutronen von etwa 1 Volt Energie besitzt, wurde ein Absorptionsversuch in Aluminium durchgeführt. Das 0,1 mm dicke Rhodiumblech war bei der Bestrahlung in Cadmium einge-

17) J. R. Dunning, G. B. Pegram, G. A. Fink und D. P. Mitchell, Phys. Rev. **48**, 265, 1935.

schlossen und sprach also vorzugsweise auf Neutronen von etwa 1 Volt an, während der früher benutzte Aluminium-Indikator ja hauptsächlich durch thermische Neutronen entsprechend einer Energie von 0,026 Volt aktiviert wurde. Wir können so leicht prüfen, ob der Absorptionskoeffizient stark von der Geschwindigkeit der absorbierten Neutronen abhängt oder nicht. Die Versuche bei 0,5 und 3 mm Aluminiumabsorption (vgl. Fig. 4) ließen jedoch keinerlei Schwächung durch die vorgeschalteten Aluminiumfolien erkennen, d. h. der Absorptionskoeffizient der von Rhodium registrierten Neutronen ist sicher bereits sehr viel kleiner als der Absorptionskoeffizient der Aluminium aktivierenden Neutronen. Damit ist also gezeigt, daß die experimentell beobachtete Neutronenabsorption nicht mit dem $1/v$-Gesetz in Widerspruch steht.

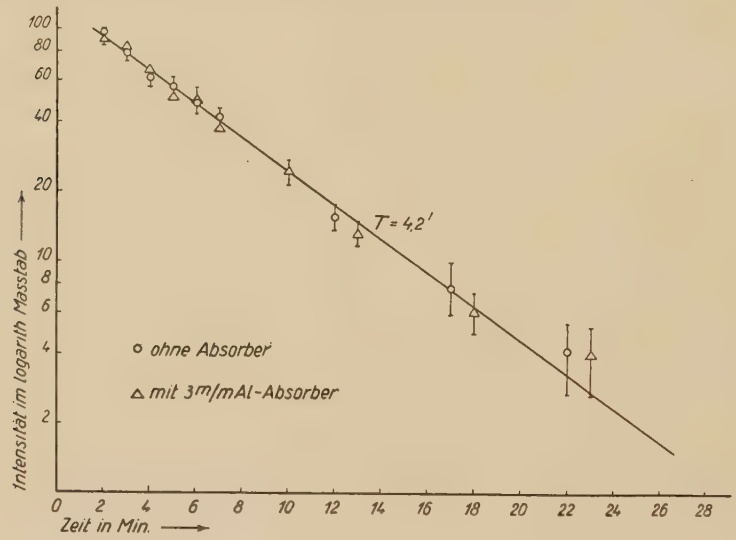

Fig. 4. Aktivierung von Rhodium durch D-Neutronen.

4. Über die Bestrahlung „innerhalb Paraffin".

a) *Verstärkung der Aktivierung.* Da der 2,3-Minuten-Körper beim Aluminium, wie oben nachgewiesen worden ist, praktisch nur durch thermische Neutronen gebildet wird, kann man zur Erzielung möglichst großer Aktivitäten die Zahl der thermischen Neutronen dadurch vergrößern, daß man die auf S. 10 erwähnte Bestrahlung „innerhalb Paraffin" benutzt. Hierbei wird ein zweiter

Paraffinblock auf den Indikator aufgesetzt, so daß er allseitig von Paraffin umgeben ist. Die mit dieser Anordnung ausgeführten Bestrahlungen ergaben eine außerordentlich vermehrte Bildung des 2,3-Minuten-Körpers, und zwar wurde z. B. eine Aktivität von 15 Teilchen pro Minute auf etwa 300 Teilchen pro Minute vergrößert. Dieser Befund ist auf die von Fermi und Mitarbeitern bereits festgestellte Tatsache zurückzuführen, daß die thermischen Neutronen bei den elastischen Zusammenstößen mit Wasserstoffkernen sehr stark reflektiert werden. Sie laufen also innerhalb des Paraffins dauernd hin und her, bis sie schließlich eingefangen werden. Für die übrigen verlangsamten Neutronen, z. B. die der Gruppe D, A, B und J konnte man keinen entsprechenden Reflektionseffekt feststellen. Die Neutronen dieser Gruppen werden bereits durch einen einzigen Zusammenstoß mit Atomen des Paraffins aus dem für sie charakteristischen Energieband herausbefördert. Aktiviert man nun also irgend eine Substanz innerhalb Paraffin, so werden die thermischen Neutronen die zu aktivierende Substanz viele Male durchlaufen und so eine starke vergrößerte Wahrscheinlichkeit haben, vom Indikator eingefangen zu werden. Für viele praktische Zwecke, bei denen es auf eine möglichst große Aktivität des 2,3-Minuten-Körpers ankommt, wird man also die Bestrahlung „innerhalb Paraffin“ anwenden. Macht man in einer solchen Anordnung Absorptionsversuche, so muß man sich natürlich darüber klar sein, daß auch die zwischengeschalteten Absorberfolien von den thermischen Neutronen mehrmals durchlaufen werden, was dann einer Vergrößerung der Absorberdicke gleichkommt. Zur Prüfung der hier geschilderten Anschauungen und um auch für die Bestrahlung „innerhalb Paraffin“ den Massenabsorptionskoeffizienten für verlangsamte Neutronen zu kennen, wurden auch in dieser Anordnung Absorptionsmessungen ausgeführt, die dadurch besonders erleichtert waren, daß bei dieser Bestrahlungsart bedeutend größere Aktivitäten zur Verfügung standen.

b) *Absorptionsmessungen.* Bei den einzelnen Versuchen wurde jedesmal der Indikator auf beiden Seiten von dem Absorber bedeckt. Als Absorber wurden Aluminiumfolien von 0,3, 0,5 und 1 mm Dicke verwandt. Die Ergebnisse sind in der Fig. 5 wiedergegeben.

Die Fig. 5 zeigt, daß bei 1 mm Aluminiumfolie eine Intensitätsschwächung auf etwa 84 Prozent eintritt. Man kann sich an Hand des oben angegebenen Absorptionskoeffizienten $K = 0{,}037$ cm^2/g überlegen, wie groß die zu erwartende Schwächung ist. Bei der benutzten Indikatordicke von 0,3 mm und der beiderseits aufgelegten Folie von 1 mm Aluminium muß ein Neutron, das diese Anordnung durchquert, einen Weg von 2,3 mm Aluminium oder

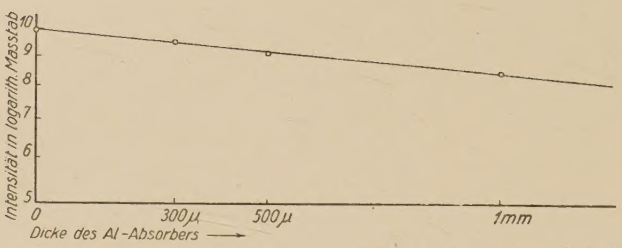

Fig. 5. Absorption von langsamen Neutronen in Aluminium bei Bestrahlung „innerhalb Paraffin".

0,62 g/cm² Aluminium zurücklegen. Infolge der großen Albedo wird das Neutron mehrere Male hin- und herlaufen (n-mal). Es ist also als Weg $\delta = 0{,}62 \cdot n$ g/cm² einzusetzen, so daß $K = 0{,}023\ n$ wird. Entnimmt man aus den Fermischen Albedo-Messungen $n = 5$ und setzt, entsprechend der Tatsache, daß die Verteilung durch den Absorber etwas gestört ist, den etwas kleineren Wert $n = 4$ ein, so ergibt die Fermische Kurve [18]) eine Schwächung auf 77 Prozent, was mit den gemessenen 84 Prozent einigermaßen übereinstimmt.

D. Zusammenfassung.

1. Es wird Aluminium mit in Paraffin verlangsamten Neutronen beschossen und gezeigt, daß die Aktivierung des 2,3-Minuten-Körpers (Einfangprozeß) durch die C-Neutronen, also im wesentlichen durch thermische Neutronen geschieht.

2. Absorptionsmessungen in Aluminium mit Aluminium als Indikator ergeben für den Absorptionskoeffizienten den Wert $K = 0{,}037$ cm²/g in Übereinstimmung mit dem von Dunning und Mitarbeitern mit Bor als Indikator gefundenen Wert. Dieser Wert entspricht einem Wirkungsquerschnitt $\sigma = 1{,}6 \cdot 10^{-24}$ cm². Dies spricht gegen das Vorhandensein eines Resonanzniveaus im thermischen Geist.

3. Es wurden Versuche beschrieben, bei denen der Indikator allseitig von Paraffin umgeben ist. Die für diesen Fall der Bestrahlung „innerhalb Paraffin" vorliegenden Verhältnisse werden diskutiert und durch Absorptionsmessungen unterstützt.

---

18) Für die Bestrahlung innerhalb Paraffin gilt nun eigentlich die im Abschnitt C 2 angegebene Kurve von Amaldi und Fermi nicht; man kann aber abschätzen, daß sie auch für den vorliegenden Fall uns einen einigermaßen richtigen Wert liefert.

Die vorliegende Arbeit wurde im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, Berlin-Dahlem, unter Leitung von Herrn Dozent Dr. K. Philipp ausgeführt.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Dr. Philipp für die freundliche Unterstützung und die vielen Anregungen bei der Durchführung dieser Arbeit meinen herzlichsten Dank aussprechen.

Ferner danke ich den Herren Dr. Flügge und Dr. Jaeckel für ihre wertvollen Vorschläge und Diskussionen.

Lebenslauf.

Ich, Paul W a n g, wurde am 8. August 1901 als Sohn des Gymnasialprofessors W a n g Si-Chi zu Tsingtao, Prov. Schantung, China, geboren. Ich besuchte die Mittelschule zu Liau-Stadt, welche ich im Winter 1921 mit dem Reifezeugnis verließ. In den Jahren 1922 bis 1928 studierte ich an der „National Universität zu Peking" Physik, Mathematik und Chemie. Von 1929 bis 1930 war ich im „National Research Institute of Physics der Academia Sinica" als Hilfslehrer tätig. Von 1931 bis 1935 bin ich als Lektor für Physik an der „National Universität von Schantung, Tsingtao" angestellt. Im Wintersemester 1935/36 und Sommersemester 1936 studierte ich an der Technischen Hochschule Charlottenburg, Wintersemester 1936/37 und Sommersemester 1937 an der Universität Berlin. Im September 1936 begann ich im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, Berlin-Dahlem, mit der Ausführung meiner Doktorarbeit.

Meine akademischen Lehrer waren in Peking die Herren Professoren Shou-Hua Lee, S. L. Ting, C. L. Young, Kia-Lok Yen, Y. C. Ho, Lin-Yü Lee; in Berlin R. Becker, M. Czerny, P. Debye, H. Kopfermann, M. v. Laue, L. Meitner, K. Philipp, C. F. v. Weizsäcker.